

Этот недостаток преодолен в нейронной сети двунаправленная ассоциативная память (ДАП) [10 – 14]. Двухнаправленная ассоциативная память состоит из двух слоев нейронов, связанных парами двухнаправленных взвешенных связей. Изображения (или n -мерные либо m -мерные входные вектора) могут подаваться соответственно на входы X - или Y -элементов. При этом не предполагается подача изображений на оба слоя элементов одновременно. Если весовая матрица для сигналов, посылаемых из X -слоя элементов в Y -слой, есть

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & \dots & w_{1k} & \dots & w_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{j1} & \dots & w_{jk} & \dots & w_{jm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{n1} & \dots & w_{nk} & \dots & w_{nm} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

то весовая матрица для сигналов от Y -элементов в X -слой имеет вид $W_1 = W^T$.

Сеть способна запоминать пары ассоциированных друг с другом образов $S^p = (s_1^p, \dots, s_n^p)$, $T^p = (t_1^p, \dots, t_m^p)$ из некоторых заданных множеств образов $S = \{S^1, \dots, S^p, \dots, S^L\}$, $T = \{T^1, \dots, T^p, \dots, T^L\}$, где L – число ассоциированных пар.

Процесс обучения ДАП с биполярными нейронами состоит в предварительной настройке весов связей между X - и Y -нейронами, задаваемых элементами матрицы (1) в соответствии с формулой:

$$w_{ij} = \sum_{p=1}^L S_i^p t_j^p, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (2)$$

Динамика ДАП в режиме определения ассоциативных изображений является итерационной. Процесс изменения выходных сигналов нейронов каждого слоя ДАП осуществляется синхронно, при этом сигналы посылаются из слоя в слой последовательно, а не одновременно в обоих направлениях. При биполярных входных векторах функции активации $f_p(U_{\text{вх.}p})$ для элементов X - и Y -слоя задаются выражением:

$$U_{\text{вых.}p}(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{если } U_{\text{вх.}p}(t) > \theta_p, \\ U_{\text{вых.}p}(t), & \text{если } U_{\text{вх.}p}(t) = \theta_p, \\ -1, & \text{если } U_{\text{вх.}p}(t) < \theta_p, \end{cases} \quad (3)$$

где θ_p – порог p -го элемента ДАП, $p = 1, \dots, n, n+1, \dots, n+m$.

Из выражения (3) следует, что если входной сигнал элемента точно равен пороговому значению, то функция активации оставляет на выходе нейрона предшествующее значение выходного сигнала. В связи с этим начальная активация нейронов обычно производится нулевыми входными сигналами. Функционирование сети может начинаться с задания изображения (входных сигналов) для любого из слоев ДАП. Алгоритм работы двоичной сети при первом предъявлении изображения S^k слою X -элементов предполагает выполнение следующих шагов:

Шаг 1. Иницируются веса связей, определяемые с помощью соотношения (2), для множества из L пар ассоциированных друг с другом двоичных изображений (S^p, T^p) , $p = \overline{1, L}$. Задается начальное время: $t = 0$.

Иницируются нулевыми входными сигналами все нейроны ДАП:

$$U_{\text{вх.}Xi}(0) = 0, U_{\text{вых.}Xi}(0) = f_i(U_{\text{вх.}Xi}) = 0, \quad i = \overline{1, n};$$

$$U_{\text{вх.}Yj}(0) = 0, U_{\text{вых.}Yj}(0) = f_j(U_{\text{вх.}Yj}) = 0, \quad j = \overline{1, m}.$$

Шаг 2. Для заданного изображения $S^k = (s_1^k, \dots, s_n^k)$ выполняются шаги 3 – 7.

Шаг 3. Задаются входные сигналы нейронов X -слоя:

$$U_{\text{вх.}Xi}(0) = s_i^k, \quad i = \overline{1, n}.$$

Задается время $t = t + 1$ и вычисляются выходные сигналы X -элементов:

$$U_{\text{вых.}Xi}(t+1) = f_i(U_{\text{вх.}Xi}(t)), \quad i = \overline{1, n}.$$

Шаг 4. До тех пор, пока не установятся выходные сигналы всех X - и Y -нейронов, выполняются шаги 5 – 7 алгоритма.

Шаг 5. Адаптируется активность элементов Y -слоя. Вычисляются входные и выходные сигналы Y -элементов:

$$U_{\text{вх.}Yj}(t+1) = \sum_{i=1}^n w_{ij} U_{\text{вых.}Xi}(t+1), \quad j = \overline{1, m};$$

$$U_{\text{вых.}Yj}(t+2) = f_j(U_{\text{вх.}Yj}(t+1)), \quad j = \overline{1, m}.$$

Выходные сигналы Y -нейронов посылаются на входы элементов X -слоя.

Шаг 6. Адаптируется активность элементов X -слоя. Вычисляются входные и выходные сигналы X -элементов:

$$U_{\text{вх.}Xi}(t+2) = \sum_{j=1}^m w_{ji} U_{\text{вых.}Yj}(t+2), \quad i = \overline{1, n};$$

$$U_{\text{вых.}Xi}(t+3) = f_i(U_{\text{вх.}Xi}(t+2)), \quad i = \overline{1, n}.$$

Выходные сигналы X -нейронов посылаются на входы элементов Y -слоя. Вычисляются входные $U_{\text{вх.}Yj}(t+3)$, $j = \overline{1, m}$ и выходные сигналы $U_{\text{вых.}Yj}(t+4)$ элементов Y -слоя.

Шаг 7. Проверяется тест на сходимость. Сравниваются выходные сигналы X -нейронов $U_{\text{вых.}Xi}(t+3)$ и $U_{\text{вых.}Xi}(t+1)$, $i = \overline{1, n}$, а также Y -нейронов $U_{\text{вых.}Yj}(t+2)$ и $U_{\text{вых.}Yj}(t+4)$, $j = \overline{1, m}$, полученные на текущей и предшествующих итерациях. Если не выполняется хотя бы одно из $(n+m)$ равенств

$$U_{\text{вых.}Xi}(t+3) = U_{\text{вых.}Xi}(t+1), \quad i = \overline{1, n};$$

$$U_{\text{вых.}Yj}(t+2) = U_{\text{вых.}Yj}(t+4), \quad j = \overline{1, m},$$

то осуществляется переход к шагу 5 алгоритма, иначе – переход к шагу 8.

Шаг 8. Останов.

ДАП может запоминать пары ассоциативных изображений, а при подаче представителя пары на соответствующий вход – выдавать ассоциативное изображение. Однако ДАП не может запоминать цепочки ассоциаций и корректировать результаты с помощью управляющих нейронов.

Цель статьи

Разработка нейросетевой двунаправленной многослойной ассоциативной памяти, которая, с одной стороны, обладает возможностью запоминания и восстановления цепочек ассоциативных изображений, а с другой стороны, возможность изменять цепочки ассоциаций с помощью управляющих нейронов.

Разработка нейросетевой многослойной ассоциативной памяти

Задача решается благодаря тому, что архитектура ДАП перестраивается путем замены одного из сенсорных слоев нейронов например, слоя Y -элементов, на N слоев (рис. 1), которые последовательно связаны друг с другом парами двунаправленных взвешенных связей и добавлением N управляющих слоев нейронов R^i ($i = \overline{1, N}$). При этом каждая пара соседних слоев нейронов фактически является двунаправленной ассоциативной памятью. В результате этого возникает возможность любому вектору $Z_{\text{вх.}}^i = (Z_{1\text{вх.}}^i, Z_{2\text{вх.}}^i, \dots, Z_{q_i\text{вх.}}^i)$ некоторого слоя сети Z^i ($i = \overline{1, N}$) поставить в соответствие ассоциативный вектор $Z_{\text{вых.}}^{i+1}$ на выходе Z^{i+1} -слоя, а вектор $Z_{\text{вх.}}^i$ рассматривать как ассоциацию входному вектору предшествующего слоя нейронной сети. При этом, с помощью слоев управляющих нейронов R^i ($i = \overline{1, N}$), можно осуществлять коррекцию векторов $Z_{\text{вх.}}^i$ ($i = \overline{1, N}$), составляющих цепочку ассоциативных изображений.

Все это дает возможность говорить о том, что любой вектор на входе X -слоя нейронной сети порождает цепочку их N двунаправленных ассоциаций, где каждый вектор Z^i ($i = \overline{1, N-1}$) входит в две ассоциации, которые можно корректировать с помощью соответствующих управляющих нейронов [15].

Память состоит из сенсорного слоя нейронов X_i ($i = \overline{1, n}$) и N слоев Z -элементов $Z^1(Z_1^1, \dots, Z_{g_1}^1), \dots, Z^N(Z_1^N, \dots, Z_{g_N}^N)$ с управляющими слоями нейронов R^i ($i = \overline{1, N}$). Каждый нейрон входного слоя X_i ($i = \overline{1, n}$) связан с каждым нейроном Z^1 -слоя парами двунаправленных взвешенных связей с весовыми коэффициентами $W_{iq_1}^{11}, W_{q_1i}^{12}$ ($i = \overline{1, n}; q_1 = \overline{1, g_1}$), каждый нейрон Z^1 -слоя связан с каждым нейроном Z^2 -слоя парами двунаправленных взвешенных связей с весовыми коэффициентами $W_{q_1q_2}^{21}, W_{q_2q_1}^{22}$ ($q_1 = \overline{1, g_1}; q_2 = \overline{1, g_2}$) и с каждым нейроном R_h^1 ($h_1 = \overline{1, p_1}$) из управляющего R^1 -слоя парами двунаправленных взвешенных связей с весовыми коэффициентами $W_{h_1q_1}^{13}, W_{q_1h_1}^{14}$ ($h_1 = \overline{1, p_1}; q_1 = \overline{1, g_1}$). По аналогии каждый Z^k -слой сети ($k = \overline{3, N}$) связан с предыдущим слоем Z^{k-1} парами двунаправленных взвешенных связей с весовыми коэффициентами $W_{q_kq_{k-1}}^{k1}, W_{q_{k-1}q_k}^{k2}$ ($q_k = \overline{1, g_k}; q_{k-1} = \overline{1, g_{k-1}}$) и с нейронами $R_{h_{k-1}}^{k-1}$ ($h_{k-1} = \overline{1, p_{k-1}}$) из управляющего R^{k-1} -слоя парами двунаправленных взвешенных связей с весовыми коэффициентами:

$$W_{h_{k-1}q_{k-1}}^{(k-1)3}, W_{q_{k-1}h_{k-1}}^{(k-1)4} (h_{k-1} = \overline{1, p_{k-1}}; q_{k-1} = \overline{1, g_{k-1}}).$$

Каждый Z^k -слой ($k = \overline{2, N-1}$) связан со следующим $Z^{(k+1)}$ -слоем парами двунаправленных взвешенных связей $W_{q_kq_{k+1}}^{(k+1)1}, W_{q_{k+1}q_k}^{(k+1)2}$ ($q_k = \overline{1, g_k}; q_{k+1} = \overline{1, g_{k+1}}$).

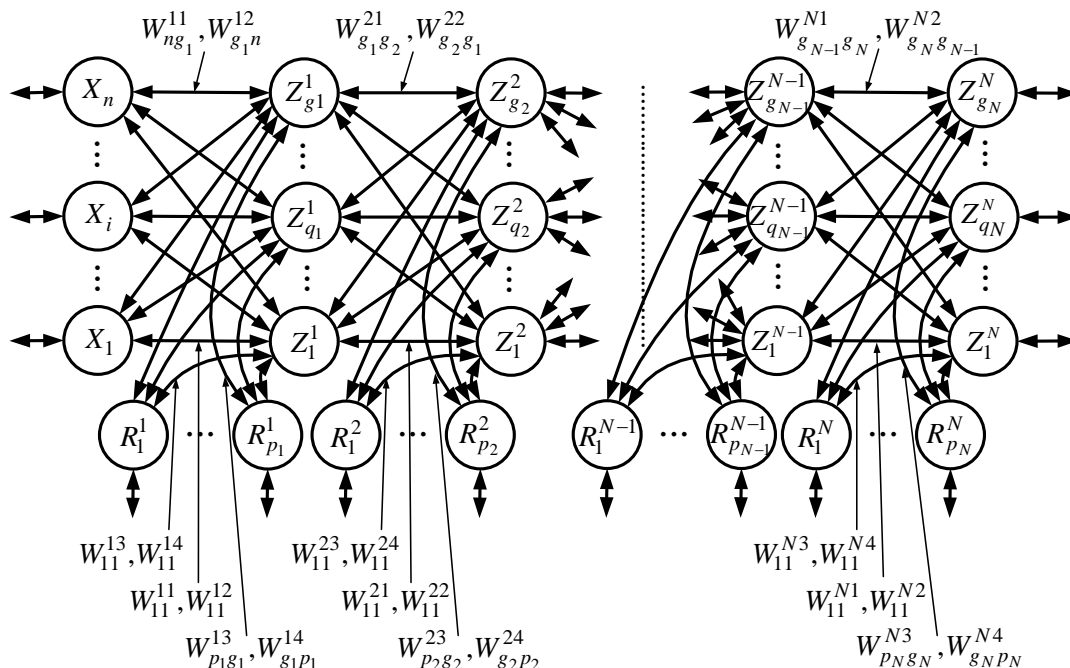


Рис. 1. Нейросетевая многослойная ассоциативная память

Каждый нейрон выходного слоя $Z_{q_N}^N$ ($q_N = \overline{1, g_N}$) связан с каждым нейроном $Z_{q_{N-1}}^{N-1}$ -слоя парами двуправленных взвешенных связей $W_{q_{N-1}q_N}^{N1}$, $W_{q_Nq_{N-1}}^{N2}$ ($q_{N-1} = \overline{1, g_{N-1}}$; $q_N = \overline{1, g_N}$) и с нейронами $R_{h_N}^N$ ($h_N = \overline{1, p_N}$) из управляющего R^N -слоя парами двуправленных взвешенных связей с весовыми коэффициентами $W_{h_Nq_N}^{N3}$, $W_{q_Nh_N}^{N4}$ ($h_N = \overline{1, p_N}$; $q_N = \overline{1, g_N}$).

Разработанная сеть функционирует в соответствии с двумя алгоритмами: обучения и распознавания. Алгоритм обучения сводится к определению обучающего набора изображений и определения матриц весов связей между слоями нейронов: X_i , Z^1 , Z^2 , ..., Z^N , с помощью соотношений вида (1) и (2) [16, 17]. Поскольку любые два Z-слоя нейронов Z^1 и Z^2 , Z^2 и Z^3 , ..., Z^{N-1} и Z^N , имеют архитектуру двуправленной ассоциативной памяти, то их функционирование аналогично классическому алгоритму функционирования ДАП. Последовательное применение классического алгоритма ДАП к слоям нейронов Z^1 и Z^2 , Z^2 и Z^3 , ..., Z^{N-1} и Z^N позволяет получать всю цепочку ассоциативных изображений $S^V, S^{V1}, S^{V2}, \dots, S^{VN}$, где S^V – входное изображение, S^{Vd} ($d = 1, 2, \dots, N$) – изображения на выходах нейронов, соответственно слоев X , Z^1 , Z^2 , ..., Z^N нейронов. Предложенная многослойная ассоциативная память является двуправленной. Поэтому, если на входы Z^N нейронов подать изображение S^{VN} , то будет получена цепочка ассоциативных изображений $S^{V(N-1)}, S^{V(N-2)}, \dots, S^{V1}, S^V$. Процессы функционирования предложенной нейронной сети в этом случае аналогичны процессам функционирования сети при подаче изображения S^V на входы слоя X-нейронов. При этом добавление в структуру новой многослойной нейросетевой памяти N слоев управляющих нейронов дает возможность построения ассоциаций с учетом дополнительной информации. Это становится возможным благодаря тому, что управляющие нейроны связаны с соответствующими слоями нейронной сети и при появлении информации на входах слоев, могут её корректировать с учетом информации на входах управляющих нейронов.

В алгоритме функционирования многослойной двуправленной ассоциативной памяти с управляющими нейронами в режиме определения цепочек ассоциаций приняты следующие обозначения:

n – число нейронов в сенсорном слое нейронов;

g_1, g_2, \dots, g_N – число элементов соответственно в слоях Z^1, Z^2, \dots, Z^N нейронной сети, $g_1 = g_2 = \dots = g_N$;

$S^V, S^{V1}, S^{V2}, \dots, S^{VN}$ ($V = \overline{1, L}$) – цепочка ассоциативных изображений;

$SR^{V1}, SR^{V2}, \dots, SR^{VN}$ ($V = \overline{1, L}$) – множества управляющих векторов;

SR^{Vk} – множество управляющих нейронов для k -

слоя Z-нейронов ($k = \overline{1, N}$);

L – число цепочек ассоциативных изображений, которые запоминаются;

V – номер цепочки ассоциативных изображений;

$t_0^1, t_1^1, t_2^1, \dots$ – последовательные моменты времени при получении ассоциативных изображений; $t_1^1 = t_0^1 + \Delta t$ или в общем виде $t_k^1 = t_{(k-1)}^1 + \Delta t$;

Δt – время, необходимое для получения выходного сигнала нейронов с помощью функции активации;

f_V – функция активации V-го элемента.

Алгоритм работы многослойной двуправленной ассоциативной памяти при подаче изображения на первый сенсорный вход, предусматривает выполнение шагов, аналогичных шагам при функционировании ДАП:

Шаг 1. Иницируются веса связей $W_{iq_1}^{11}, W_{q_1i}^{12}$ ($i = \overline{1, n}$; $q_1 = \overline{1, g_1}$). Задается начальное время: $t = t_0^1$. Иницируются нулевыми входными сигналами все нейроны сети:

$$\begin{aligned} U_{\text{вх.}X_i}(0) &= 0; U_{\text{вых.}X_i}(0) = f_i(U_{\text{вх.}X_i}) = 0; i = \overline{1, n}; \\ U_{\text{вх.}Z_{q_r}^r}(0) &= 0; U_{\text{вых.}Z_{q_r}^r}(0) = f_{q_r}(U_{\text{вх.}Z_{q_r}^r}) = 0; q_r = \overline{1, g_r}; r = \overline{1, N}; \\ U_{\text{вх.}R_{h_r}^r}(0) &= 0; U_{\text{вых.}R_{h_r}^r}(0) = f_{h_r}(U_{\text{вх.}R_{h_r}^r}) = 0; h_r = \overline{1, p_r}; r = \overline{1, N}. \end{aligned}$$

Шаг 2. Для изображения $S^V = (S_1^V, \dots, S_n^V)$ из произвольной цепочки обучающих изображений $S^V, S^{V1}, S^{V2}, \dots, S^{VN}$ ($V = \overline{1, L}$), выполняются шаги 3 – 7.

Шаг 3. Задаются входные сигналы нейронов X-слоя и управляющего R^1 -слоя сети:

$$\begin{aligned} U_{\text{вх.}X_i}(t_0^1) &= S_i^V, i = \overline{1, n}; \\ U_{\text{вх.}R_{h_1}^1}(t_0^1) &= SR_{h_1}^V, h_1 = \overline{1, p_1}. \end{aligned}$$

В интервале времени $[t_0, t_1^1 = t_0^1 + \Delta t]$ вычисляются выходные сигналы нейронов X- и R^1 -слоя элементов:

$$\begin{aligned} U_{\text{вых.}X_i}(t_1^1) &= f_i(U_{\text{вх.}X_i}(t_0^1)), i = \overline{1, n}; \\ U_{\text{вых.}R_{h_1}^1}(t_1^1) &= f_{h_1}(U_{\text{вх.}R_{h_1}^1}(t_0^1)), h_1 = \overline{1, p_1}. \end{aligned}$$

Шаг 4. Пока не установятся выходные сигналы всех X- и Z^1 -нейронов, выполняются шаги 5 – 7.

Шаг 5. Адаптируется активность элементов Z^1 -слоя. Вычисляются входные и выходные сигналы Z^1 -элементов:

$$\begin{aligned} U_{\text{вх.}Z_{q_1}^1}(t_1^1) &= \sum_{i=1}^n W_{iq_1}^{11} U_{\text{вых.}X_i}(t_1^1) + \sum_{h_1=1}^{p_1} W_{h_1q_1}^{13} U_{\text{вых.}R_{h_1}^1}(t_1^1), \\ i &= \overline{1, n}; q_1 = \overline{1, g_1}; h_1 = \overline{1, p_1}; \\ U_{\text{вых.}Z_{q_1}^1}(t_2^1) &= f_{q_1}(U_{\text{вх.}Z_{q_1}^1}(t_1^1)); q_1 = \overline{1, g_1}. \end{aligned}$$

Выходные сигналы Z^1 -нейронов посылаются на входы элементов X- и R^1 -слоев.

Шаг 6. Адаптируется активность элементов X- и R^1 -слоев. Вычисляются входные и выходные сигналы нейронов X- и R^1 -слоев:

$$U_{\text{ВХ}.X_i}(t_2^1) = \sum_{q_1=1}^{g_1} W_{q_1 i}^{12} U_{\text{ВЫХ}.Z_{q_1}^1}(t_2^1), \quad i = \overline{1, n}; \quad q_1 = \overline{1, g_1};$$

$$U_{\text{ВЫХ}.X_i}(t_3^1) = f_i(U_{\text{ВХ}.X_i}(t_2^1)), \quad i = \overline{1, n};$$

$$U_{\text{ВХ}.R_{h_1}^1}(t_2^1) = \sum_{q_1=1}^{g_1} W_{q_1 h_1}^{14} U_{\text{ВЫХ}.Z_{q_1}^1}(t_2^1), \quad h_1 = \overline{1, p_1};$$

$$q_1 = \overline{1, g_1};$$

$$U_{\text{ВЫХ}.R_{h_1}^1}(t_3^1) = f_i(U_{\text{ВХ}.R_{h_1}^1}(t_2^1)), \quad h_1 = \overline{1, p_1}.$$

Выходные сигналы нейронов X - и R^1 -слоев посылаются на входы элементов Z^1 -слоя:

$$U_{\text{ВХ}.Z_{q_1}^1}(t_3^1) = \sum_{i=1}^n W_{i q_1}^{11} U_{\text{ВЫХ}.X_i}(t_3^1) + \sum_{h_1=1}^{p_1} W_{h_1 q_1}^{13} U_{\text{ВЫХ}.R_{h_1}^1}(t_3^1),$$

$$q_1 = \overline{1, g_1}; \quad i = \overline{1, n}; \quad h_1 = \overline{1, p_1};$$

$$U_{\text{ВЫХ}.Z_{q_1}^1}(t_4^1) = f_{q_1}(U_{\text{ВХ}.Z_{q_1}^1}(t_3^1)); \quad q_1 = \overline{1, g_1}.$$

Шаг 7. Проверяется тест на сходимость. Сравниваются выходные сигналы нейронов X -слоя $U_{\text{ВЫХ}.X_i}(t_3^1)$ и $U_{\text{ВЫХ}.X_i}(t_1^1)$, $i = \overline{1, n}$, выходные сигналы управляющих нейронов R^1 -слоя $U_{\text{ВЫХ}.R_{h_1}^1}(t_3^1)$ и $U_{\text{ВЫХ}.R_{h_1}^1}(t_1^1)$, $h_1 = \overline{1, p_1}$, а также выходные сигналы нейронов Z^1 -слоя $U_{\text{ВЫХ}.Z_{q_1}^1}(t_2^1)$ и $U_{\text{ВЫХ}.Z_{q_1}^1}(t_4^1)$, $q_1 = \overline{1, g_1}$, которые получены на текущей и предыдущей итерациях. Если не выполнено хотя бы одно равенство

$$U_{\text{ВЫХ}.X_i}(t_3^1) = U_{\text{ВЫХ}.X_i}(t_1^1), \quad i = \overline{1, n};$$

$$U_{\text{ВЫХ}.R_{h_1}^1}(t_3^1) = U_{\text{ВЫХ}.R_{h_1}^1}(t_1^1), \quad h_1 = \overline{1, p_1};$$

$$U_{\text{ВЫХ}.Z_{q_1}^1}(t_2^1) = U_{\text{ВЫХ}.Z_{q_1}^1}(t_4^1), \quad q_1 = \overline{1, g_1},$$

то переход к шагу 5 алгоритма, иначе – на выходе Z^1 -слоя получено изображение S_1^{V1} , которое является входным изображением для Z^2 -слоя ассоциативной памяти и осуществляется переход к шагу 8.

Для получения последующих изображений выполняются шаги 8 – 15 алгоритма, когда на каждом из слоев Z -нейронов получается одно изображение из цепочки ассоциаций, где $k = \overline{1, N}$.

Шаг 8. Иницируются веса связей $W_{q_k q_{(k+1)}}^{k1}$, $W_{q_{(k+1)} q_k}^{k2}$ ($q_k = \overline{1, g_k}$; $q_{(k+1)} = \overline{1, g_{(k+1)}}$) и задается начальное время для определения изображения на выходе Z^k -слоя нейронов ($k > 1$): t_0^k .

Шаг 9. Для изображения $S_k^V = (S_{k1}^V, \dots, S_{kn}^V)$, полученного на слое Z^k -нейронов, выполняются шаги 10 – 14.

Шаг 10. В интервале времени $[t_0^k, t_1^{(1+k)}]$ вычисляются выходные сигналы нейронов Z^k - и R^k -слоя элементов:

$$U_{\text{ВЫХ}.Z_{q_k}^k}(t_1^{(1+k)}) = U_{\text{ВХ}.Z_{q_k}^k}(t_r^k); \quad q_k = \overline{1, g_k},$$

$$U_{\text{ВЫХ}.R_{h_k}^k}(t_1^{(1+k)}) = U_{\text{ВХ}.R_{h_k}^k}(t_r^k), \quad h_k = \overline{1, p_k}.$$

где t_r^k ($r \in \{4, 6, 8, \dots\}$) – момент времени получения выходного сигнала на слое Z^k -элементов на предыдущей итерации.

Шаг 11. Пока не установятся выходные сигналы всех Z^k - и $Z^{(k+1)}$ -нейронов, выполняются шаги 12 – 14.

Шаг 12. Адаптируется активность элементов $Z^{(k+1)}$ -слоя. Вычисляются входные и выходные сигналы $Z^{(k+1)}$ -элементов:

$$U_{\text{ВХ}.Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_1^{(1+k)}) = \sum_{q_k=1}^{g_k} W_{q_k q_{(k+1)}}^{k1} U_{\text{ВЫХ}.Z_{q_k}^k}(t_1^{(1+k)}) + \sum_{h_k=1}^{p_k} W_{h_k q_{(k+1)}}^{k3} U_{\text{ВЫХ}.R_{h_k}^k}(t_1^{(1+k)}),$$

$$q_{(k+1)} = \overline{1, g_{(k+1)}};$$

$$q_k = \overline{1, g_k}; \quad h_k = \overline{1, p_k};$$

$$U_{\text{ВЫХ}.Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_2^{(1+k)}) = f_{q_{(k+1)}}(U_{\text{ВХ}.Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_1^{(1+k)})),$$

$$q_{(k+1)} = \overline{1, g_{(k+1)}}; \quad q_k = \overline{1, g_k}.$$

Выходные сигналы $Z^{(k+1)}$ -нейронов посылаются на входы элементов Z^k - и $R^{(k+1)}$ -слоев.

Шаг 13. Адаптируется активность элементов Z^k - и $R^{(k+1)}$ -слоев. Вычисляются входные и выходные сигналы нейронов Z^k и $R^{(k+1)}$ -слоев.

$$U_{\text{ВХ}.Z_{q_k}^k}(t_2^{(1+k)}) = \sum_{q_{(k+1)}=1}^{g_{(k+1)}} W_{q_{(k+1)} q_k}^{k2} U_{\text{ВЫХ}.Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_2^{(1+k)}),$$

$$q_k = \overline{1, g_k}; \quad q_{(k+1)} = \overline{1, g_{(k+1)}};$$

$$U_{\text{ВЫХ}.Z_{q_k}^k}(t_3^{(1+k)}) = f_i(U_{\text{ВХ}.Z_{q_k}^k}(t_2^{(1+k)})),$$

$$q_k = \overline{1, g_k}; \quad q_{(k+1)} = \overline{1, g_{(k+1)}};$$

$$U_{\text{ВХ}.R_{h_k}^k}(t_2^{(1+k)}) = \sum_{q_{(k+1)}=1}^{g_{(k+1)}} W_{q_{(k+1)} h_k}^{k4} U_{\text{ВЫХ}.Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_2^{(1+k)}),$$

$$h_k = \overline{1, p_k}; \quad q_{(k+1)} = \overline{1, g_{(k+1)}};$$

$$U_{\text{ВЫХ}.R_{h_k}^k}(t_3^{(1+k)}) = f_i(U_{\text{ВХ}.R_{h_k}^k}(t_2^{(1+k)})), \quad h_k = \overline{1, p_k}.$$

Выходные сигналы нейронов Z^k - и R^k -слоев посылаются на входы элементов $Z^{(k+1)}$ -слоя:

$$U_{\text{ВХ}.Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_3^{(1+k)}) = \sum_{q_k=1}^{g_k} W_{q_k q_{(k+1)}}^{k1} U_{\text{ВЫХ}.Z_{q_k}^k}(t_3^{(1+k)}) + \sum_{h_k=1}^{p_k} W_{h_k q_{(k+1)}}^{k3} U_{\text{ВЫХ}.R_{h_k}^k}(t_3^{(1+k)}),$$

$$q_{(k+1)} = \overline{1, g_{(k+1)}};$$

$$q_k = \overline{1, g_k}; \quad h_k = \overline{1, p_k};$$

$$U_{\text{ВЫХ}.Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_4^{(1+k)}) = f_{q_{(k+1)}}(U_{\text{ВХ}.Z_{q_{(k+1)}}^{(k+1)}}(t_3^{(1+k)}));$$

$$q_{(k+1)} = \overline{1, g_{(k+1)}}; \quad q_k = \overline{1, g_k}.$$

Шаг 14. Проверяется тест на сходимость. Сравниваются выходные сигналы нейронов Z^k -слоя $U_{\text{ВЫХ}.Z_{q_k}^k}(t_3^{(1+k)})$ и $U_{\text{ВЫХ}.Z_{q_k}^k}(t_1^{(1+k)})$, $q_k = \overline{1, g_k}$, выходные сигналы управляющих нейронов R^k -слоя $U_{\text{ВЫХ}.R_{h_k}^k}(t_3^{(1+k)})$

и $U_{\text{Вых.}R_{h_k}^k}(t_1^{(1+k)}), h_k = \overline{1, p_k}$, а также выходные сигналы нейронов $Z_{\text{Вых.}Z_{q(k+1)}^{(k+1)}}(t_2^{(1+k)})$ и $U_{\text{Вых.}Z_{q(k+1)}^{(k+1)}}(t_4^{(1+k)})$, $q_{(k+1)} = \overline{1, g_{(k+1)}}$, которые получены на текущей и предыдущей итерациях. Если не выполнено хоть одно равенство:

$$U_{\text{Вых.}Z_{q_k}^k}(t_3^{(1+k)}) = U_{\text{Вых.}Z_{q_k}^k}(t_1^{(1+k)}), q_k = \overline{1, g_k};$$

$$U_{\text{Вых.}R_{h_k}^k}(t_3^{(1+k)}) = U_{\text{Вых.}R_{h_k}^k}(t_1^{(1+k)}), h_k = \overline{1, p_k};$$

$$U_{\text{Вых.}Z_{q(k+1)}^{(k+1)}}(t_2^{(1+k)}) = U_{\text{Вых.}Z_{q(k+1)}^{(k+1)}}(t_4^{(1+k)}),$$

$$q_{(k+1)} = \overline{1, g_{(k+1)}},$$

то переход к шагу 12 алгоритма, если $k+1 < N$, то $k = k+1$ и переход к шагу 8, иначе – к шагу 15 алгоритма.

Шаг 15. Останов.

В [16] приведен пример обучения новой многослойной сети с биполярными нейронами для запоминания двух цепочек ассоциативных изображений с учетом управляющей информации.

Разработано программное обеспечение, моделирующее архитектуру и алгоритмы функционирования многослойной дискретной двунаправленной ассоциативной памяти с управляющими нейронами. Программа позволяет в процессе работы нейронной сети восстанавливать по входной информации, подаваемой на входы X - или Z^N -нейронов цепочки ассоциативных изображений. Программа также позволяет корректировать ассоциативные данные с учетом дополнительной информации, хранящейся в управляющих нейронах при восстановлении цепочки изображений ассоциативных входной информации с X -слоя нейронов.

Выводы

Таким образом, впервые на основе двунаправленной ассоциативной памяти предложена архитектура и алгоритмы функционирования новой двунаправленной многослойной дискретной нейронной сети, которая способна восстанавливать по входной информации подаваемой на любой из двух ее входов цепочки ассоциативных изображений и изменять цепочки ассоциаций с учетом дополнительной информации, подаваемой на управляющие нейроны. На архитектуру и алгоритмы функционирования нейросетевой памяти получен патент Украины на изобретение.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский, В.И.** Нейронні мережі в системах автоматизації / В.И. Архангельский, І.М. Богаєнко, Г.Г. Грабовський, М.О. Рюмшин. – К.: Техніка, 1999. – 364 с.
2. **Каллан, Р.** Основные концепции нейронных сетей / Р. Каллан. – М.: Вильямс, 2001. – 288 с.
3. **Дмитриенко, В.Д.** Основы теории нейронных сетей / В.Д. Дмитриенко, Н.И. Корсунов. – Белгород: БИ-ИММАП, 2001. – 159 с.

4. **Комашинский, В.И.** Нейронные сети и их применение в системах управления и связи / В.И. Комашинский, Д.А. Смирнов – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 94 с.
5. **Бодянский, Е.В.** Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применение / Е.В. Бодянский, О.Г. Руденко. – Харьков: ТЕЛЕТЕХ, 2004. – 372 с.
6. **Галушкин, А.И.** Нейрокомпьютеры и их применение на рубеже тысячелетий в Китае: в 2 т. / А.И. Галушкин. Т. 1. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 367 с.
7. **Барский, А.Б.** Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений / А.Б. Барский. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с.
8. **Осовский, С.** Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.
9. **Дмитриенко, В.Д.** Нейросетевое устройство направленных ассоциаций / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, И.П. Хавина // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия История, политология, экономика, информатика. – № 7 (78). – Вип. 14/1. – Белгород, 2010. – С. 110-119.
10. **Хайкин, С.** Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
11. **Яхьяева, Г.Э.** Нечеткие множества и нейронные сети: Учебное пособие / Г.Э. Яхьяева. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; Бином. Лаборатория знаний, 2006. – 316 с.
12. **Галушкин, А.И.** Нейронные сети: основы теории / А.И. Галушкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 496 с.
13. **Рутковский, Лешек.** Методы и технологии искусственного интеллекта / Лешек Рутковский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 520 с.
14. **Дмитриенко, В.Д.** Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. – Харьков: Изд. центр НТМТ, 2013. – 248 с.
15. **Дмитрієнко, В.Д.** Пристрій багатозарової двонаправленої асоціативної пам'яті з керуючими нейронами / В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковоротний, І.П. Хавіна, В.О. Бречко // Патент на винахід 108712 Україна, МПК G06G 7/60. Заявник та володар патенту НТУ "ХПІ". – № а 2014 04330; Заявлено 22.04.2014; Опубліковано 25.05.2015; Бюл. № 10.
16. **Дмитрієнко, В.Д.** Пристрій багатозарової двонаправленої асоціативної пам'яті / В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковоротний, І.П. Хавіна, В.О. Бречко // Патент на винахід 108947 Україна, МПК G06G 7/60. Заявник та володар патенту НТУ "ХПІ". – № а 2014 02402; Заявлено 11.03.2014; Опубліковано 25.06.2015; Бюл. № 12.
17. **Дмитриенко, В.Д.** Многослойная нейросетевая память, хранящая цепочки ассоциаций / В.Д. Дмитриенко, Р.П. Мигущенко, А.Ю. Заковоротный, В.А. Бречко / Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Х.: НТУ "ХПИ". – № 33 (1142). – 2015. – С. 57-67.